

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

дата защиты 24.06.2016, протокол № \_\_\_\_\_

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 501.001.89  
ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Афанасьев Андрей Александрович, лаборатория Общей гидромеханики  
Научно-исследовательского института механики ФГБОУ ВПО Московский  
государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
ведущий научный сотрудник

Диссертация «Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в широком диапазоне давлений и температур» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы выполнена в лаборатории Общей гидромеханики Научно-исследовательского института механики ФГБОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Диссертация принята к защите 18.03.2016 года, протокол № 108 - П, диссертационным советом Д 501.001.89 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119234, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, действующего на основании приказа № 105/нк Министерства образования и науки Российской Федерации от 11 апреля 2012 года.

**Соискатель** Афанасьев Андрей Александрович, 1984 года рождения, в 2006 году окончил Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, в 2008 году защитил в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 –

Механика жидкости газа и плазмы. С 2005 года по настоящее время работает в лаборатории Общей гидромеханики Научно-исследовательского института механики ФГБОУ ВПО МГУ имени М.В. Ломоносова, с 2011 года по настоящее время – в должности ведущего научного сотрудника.

**Научный консультант:**

доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, заведующий лабораторией Общей гидромеханики НИИ механики ФГБОУ ВПО МГУ имени М.В. Ломоносова, Мельник Олег Эдуардович;

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор, директор, Тюменский филиал, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук, Губайдуллин Амир Анварович;

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего профессионального образования Российский государственный университет (НИУ) нефти и газа имени И.М. Губкина, Дмитриев Николай Михайлович;

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Математический институт имени В.А. Стеклова Российской академии наук, Ильичев Андрей Теймуразович;

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук. Заключение составлено Никифоровым Анатолием Ивановичем (доктор физ.-мат. наук, профессор, и.о. главного научного сотрудника, заведующий лабораторией Математического моделирования процессов фильтрации, и утверждено директором ФГБУН Институт механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук Губайдуллиным Дамиром Анваровичем)

**дали положительные отзывы о диссертации.**

На диссертацию и автореферат поступили отзывы научного консультанта, официальных оппонентов и ведущей организации, на автореферат поступило 2 положительных отзыва и 1 положительная рецензия на научную работу Афанасьева А.А. из зарубежного научно-исследовательского центра.

**В отзыве научного консультанта Мельника О.Э. отмечено, что в докторской диссертации Афанасьев А.А. существенно развил научное направление, связанное с моделированием фильтрации бинарных смесей в широком диапазоне давлений и температур. Принципиальная сложность моделирования этих процессов связана с сильной нелинейностью зависимости теплофизических свойств от температуры и давления, особенно в окрестности критических параметров, необходимостью учета реального геологического строения проницаемых пластов, фазовых переходов и изменений компонентного состава фильтрующегося флюида. Афанасьев А.А. умело учел все это в диссертации, что делает ее тематику и результаты современными и актуальными.**

В диссертации Афанасьева А.А. теория многофазной фильтрации получила существенное развитие как в теоретическом, так и в практическом плане. Сформулирована общая постановка задач многофазной фильтрации, получено обобщение формулировки Годунова для гиперболических систем на случай систем смешанного типа, описывающих фильтрацию. Выведено уравнение и получено условие неотрицательного производства энтропии, разработан класс конечно-разностных схем, удовлетворяющих этому условию. Разработан оригинальный метод расчета теплофизических свойств бинарных смесей в широком диапазоне температур и давлений, включая до- и сверхкритические значения. На его основе создан уникальный комплекс программ для трехмерного моделирования неизотермических задач фильтрации, превосходящий по своим возможностям имеющиеся коммерческие и научно-исследовательские пакеты программ. С использованием этого пакета проведены обширные разносторонние исследования захоронения углекислого газа в водонасыщенных пластах, конвекции в геотермальных системах, питающихся флюидами из

магматического очага, и остывания кимберлитовых трубок с учетом минеральных реакций.

В проведенных исследованиях Афанасьев А.А. успешно совместил аналитические и численные методы решения сложных нелинейных задач фильтрации. Результаты работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах. Они неоднократно докладывались на ведущих международных конференциях. Программный комплекс, разработанный Афанасьевым А.А. в процессе работы над диссертацией, используется учеными России, Германии, Италии и Великобритании для проведения расчетов в различных геофизических задачах, не ограничивающихся приложениями, рассмотренными в диссертации. Он неоднократно приглашался в научно-исследовательские институты и университеты данных стран для проведения совместных исследований в области многофазной фильтрации и семинаров по использованию разработанного комплекса программ.

А.А. Афанасьев лауреат медали и премии РАН для молодых ученых, премии Международной академической издательской компании «НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА» за лучшую публикацию в журналах РАН, призер конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова (2004 – 2015); в 2009, 2010, 2012, 2013, 2015, 2016 награждался стипендией МГУ имени М.В. Ломоносова. В 2014 получил диплом 1-й степени на VI молодежной научно-практической конференции «Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Он является руководителем гранта РФФИ для ведущих молодежных коллективов. Он руководит дипломными и курсовыми работами студентов механико-математического факультета.

В отзыве научного консультанта делается заключение, что А.А. Афанасьев является сложившимся ученым мирового класса. Выполненная им диссертационная работа безусловно является серьезным вкладом в исследования в области механики фильтрационных течений. Научный консультант считает, что А.А. Афанасьев безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

**В отзыве официального оппонента Губайдуллина А.А. отмечено, что актуальность диссертационной работы Афанасьева А.А. не вызывает сомнений как с научной точки зрения – исследованы новые нелинейные эффекты многофазной фильтрации, так и в прикладном плане – результаты могут применяться для надежного научно-обоснованного прогнозирования и оптимизации показателей эксплуатации недр Земли. Диссертация позволяет расширить приложение моделей фильтрации на случай широких диапазонов давлений и температур. Сложность исследуемых течений заключается в том, что в них может достигаться критическая температура фильтрующегося флюида, в окрестности которой его теплофизические свойства претерпевают быстрые изменения. Также могут образовываться фронты фазового перехода – разрывы параметров течения, на которых имеет место испарение или конденсация. Для исследования данных процессов в диссертации успешно применены как аналитические методы в области механики сплошных сред и нелинейных сред, так и многопроцессорные вычислительные технологии.**

В диссертационной работе разработан новый метод моделирования неизотермической фильтрации, позволивший решить значительное число новых задач фильтрации как в проблемах рационального недропользования, так и в приложении к природным процессам. В диссертации умело сочетаются как теоретические исследования фильтрации в упрощенных постановках, так и численные исследования течений в реальных геологических пластах. В качестве наиболее значимого для практических приложений результата следует выделить создание комплекса программ для моделирования фильтрации. Указанный комплекс может применяться для решения широкого круга задач: при прогнозировании показателей разработки месторождений углеводородов, источников геотермальной энергии, а также при моделировании подземного хранения газа.

Обоснованность научных положений и достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, не вызывает сомнений. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых апробированных подходов к математическому моделированию термогидродинамических процессов в гетерогенных средах;

корректностью постановок задач на основе уравнений механики многофазных сред; применением для решения задач современных методов вычислительной гидродинамики; сопоставлением полученных результатов, в частных случаях, с результатами других авторов, известными из научной литературы, с экспериментальными данными о теплофизических свойствах бинарной смеси углекислый газ-вода и наблюдениями за природными геофизическими системами.

По работе можно сформулировать следующие замечания:

1. Основное содержание диссертации посвящено моделированию фильтрации бинарной смеси углекислый газ-вода. В связи с этим встает вопрос о применимости разработанного метода моделирования к задачам фильтрации других бинарных смесей, например, углеводородных;
2. Несомненно, построенные в разделе 5.2 решения задачи Римана имеют фундаментальное значение. Однако их применение на практике для описания закачки газа ограничено не только гравитационным расслоением фаз, влияние которого оценивается в разделе 5.2.3, но и несовершенным вскрытием пласта скважиной или наклонным/горизонтальным положением скважины. Также в решении задачи Римана не учитывается теплообмен с непроницаемыми породами кровли и подошвы пласта;
3. В разделе 6.1 нечетко описано влияние критических термодинамических условий на интенсивность конвекции в геотермальной системе.

В отзыве отмечено, что данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

На основании изложенного официальный оппонент считает, что диссертация Афанасьева А.А. представляет собой законченное и полное исследование рассматриваемой проблемы. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие теории неизотермической многофазной фильтрации. По сути поставленных задач, проведенных исследований и полученных результатов, работа полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05. Автореферат соответствует содержанию

диссертации, а сама диссертационная работа соответствует требованиям п.9 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней». Афанасьев А.А. безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

**В отзыве официального оппонента Дмитриева Н.М. отмечено, что** диссертационная работа Афанасьева А.А. посвящена многофазным течениям жидкостей и газов в пористой среде с взаимосвязанными гидродинамическими и термодинамическими явлениями, обусловленными фазовыми превращениями и критическими условиям. Многие модели фильтрации ограничены только докритическими термодинамическими условиями. Проблема их развития на случай околокритических и сверхкритических условий связана с тем, что при критических условиях плотности, вязкости и компонентный состав фаз чувствительны к малым изменениям давления и температуры; они нелинейно зависят от термобарических условий. Как следствие, теоретическое исследование и численное моделирование фильтрации в широком диапазоне давлений и температур, в котором возможно несколько различных линий критических параметров и качественно различные многофазные парожидкостные равновесия, вызывает значительные аналитические и вычислительные трудности. Исследованию фильтрации в подобных условиях посвящена диссертационная работа Афанасьева А.А. Тема диссертации актуальна также для многих задач рационального недропользования, в частности для разработки углеводородных месторождений, подземного хранения газа и других приложений. Более точное описание фильтрации позволяет надежнее прогнозировать показатели эксплуатации пластов и оптимизировать их разработку.

Нелинейный характер моделей фильтрации существенно ограничивает применение аналитических методов исследования, способствуя развитию методов прямого численного моделирования. Исследование и расчет фильтрационных процессов остается очень востребованным как в научных исследованиях, так и при обосновании и оптимизации методов разработки

месторождений полезных ископаемых. В этой связи, разработанный автором комплекс программ для численного моделирования фильтрации, в котором используются новые предложенные в диссертации методы, является актуальным результатом работы, имеющим практическую значимость.

Новизна диссертационной работы состоит в развитии знаний в области неизотермической многофазной фильтрации при до- и сверхкритических термодинамических условиях, определением требований к корректным постановкам задач неизотермической фильтрации, решением новых фундаментальных и прикладных задач в различных приложениях рационального недропользования.

Достоверность результатов обеспечена тем, что автор использует классические уравнения механики сплошной среды и известные результаты теории нелинейных волн и сильных разрывов. Достоверность расчета теплофизических свойств бинарной смеси углекислый газ-вода обеспечивается хорошим совпадением результатов расчетов с лабораторными измерениями, доступными из открытых источников. Достоверность результатов расчетов гидродинамики обеспечивается применением традиционной для задач фильтрации противоточной конечно-разностной схемы и совпадением результатов расчетов модельных задач с численными решениями, полученными другими авторами. Также, достоверность исследований подтверждается совпадением результатов расчета конвекции в геотермальной системе Campi Flegrei с натурными измерениями потоков газа и тепла на поверхности и с измерениями температуры в геотермальных скважинах.

В отзыве отмечено, что основные результаты диссертации опубликованы в 17 статьях в журналах из перечня ВАК.

В дальнейшем результаты диссертации, особенно разработанный комплекс программ могут использоваться в проектных институтах нефтегазовой отрасли для расчета показателей разработки месторождений, а также в образовательных и исследовательских целях в институтах нефтегазового профиля.

По диссертационной работе Афанасьева А.А. можно сделать следующие замечания:

1. В работе не уделено достаточно внимания влиянию примеси соли в воде на рассмотренные процессы фильтрации углекислого газа и воды. Соленость существенно влияет на плотность и вязкость жидкой фазы и, также, на растворимость газа;
2. В исследованиях не нашел отражения вопрос как изменятся волновые конфигурации в случае, если учесть растекание газа вдоль кровли пласта. В одномерной постановке задачи Римана течение газа в вертикальном направлении к кровле пласта не учитывается.

Отмечено, что данные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

В отзыве официального оппонента делается заключение, что диссертация Афанасьева А.А. представляет собой законченную, актуальную, достоверную и обоснованную научно-исследовательскую работу, с возможностью практического применения и потенциалом дальнейшего исследования. Работа выполнена на высоком научном уровне. Диссертационная работа написана квалифицированно и последовательно. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Афанасьева А.А. «Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в широком диапазоне давлений и температур» соответствует всем критериям, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

**В отзыве официального оппонента Ильичева А.Т. отмечено, что диссертация А.А. Афанасьева посвящена исследованию многофазных течений жидкостей и газов в пористой среде при самосогласованных гидродинамических и термодинамических явлениях, которые обусловлены фазовыми превращениями и критическими или околокритическими условиями. Результаты подобного исследования представляют несомненный интерес и в высокой степени актуальны для подземной гидромеханики, когда течения реализуются при критических значениях физических параметров. Тематика данных исследований связана, например, с захоронением**

углекислого газа в проницаемых геологических пластах, с особенностями течений в геотермальных системах, с формированием рудных месторождений при остывании кимберлитовых трубок, с разработкой нефтяных и газовых месторождений.

В отзыве отмечено, что специального упоминания заслуживают следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Получена общая форма записи уравнений многокомпонентной многофазной фильтрации, обобщающая представление Годунова для гиперболических систем. Представление имеет не только теоретическое, но и практическое значение, например, для создания конечно-разностных схем фильтрации;
2. На основе полученных уравнений решены новые теоретические задачи и проведены трехмерные инженерные расчеты в проблемах подземного захоронения углекислого газа. Решена классическая задача Римана, описывающая закачку сверхкритического углекислого газа в водонасыщенный пласт, и даны рекомендации по использованию решений для анализа термогидродинамических процессов в призабойной зоне скважины;
3. Создан комплекс программ, который с учетом инженерных данных и на базе полученных уравнений позволяет моделировать неизотермическую фильтрацию в широком спектре задач рационального природопользования и в природных процессах.

Результаты диссертации являются достоверными и полностью обоснованными, так как при их получении использовались точные теоретические методы математики и апробированные методы механики сплошной среды. Все декларированные в диссертации результаты являются новыми и представляющими значительный интерес. Особенно стоит отметить новую запись уравнений многокомпонентной многофазной фильтрации и расчет на базе этих уравнений ряда сложных инженерных задач: таким образом, налицо все составляющие, сопутствующие апробированному описанию сложного явления: аналитическое описание явления и выполненный с учетом ожидаемых результатов достоверный численный расчет.

Диссертация написана ясным и доступным языком, результаты изложены понятно. К возможным недостаткам работы (точнее к неполноте логической картины, представленной в ней) официальный оппонент относит следующие:

1. В разделе 5.2 решена краевая задача Римана о нагнетании газа в пласт. При этом предполагается, что решение одномерно и зависит только от продольной координаты и от времени, т. е. одномерно. Не учитывается конечная протяженность пласта по вертикали. Таким образом, одномерное решение справедливо только конечное время, пока возмущение не дойдет до вертикальных границ пласта. Официальный оппонент считает, что было бы целесообразно оценить величину этого времени.
2. Устойчивость переднего фронта  $S_3$  исследована следующим образом (глава 5). Предполагается, что область между передним фронтом и вторым разрывом  $S_2$  в решении, соответствует постоянной температуре, равной температуре пласта. Тогда локально справедлива модель для изотермической двухфазной фильтрации Баклея-Левретта, а условие гидродинамической неустойчивости разрыва в этой модели известно. У официального оппонента, в связи с этим, возникает вопрос. По сути дела, исследуется устойчивость разрыва с постоянной температурой во всей области течения (за разрывом  $S_2$  тоже температура должна быть постоянна). Однако в полученных решениях область за разрывом  $S_2$  не является областью изотермического течения и температура в ней не постоянна. Вопрос: насколько неизотермическая область за разрывом  $S_2$  влияет на устойчивость переднего фронта? Ответ на этот вопрос должен зависеть от того, какую длину (по сравнению с размерами области между  $S_2$  и  $S_3$ ) имеет наиболее неустойчивая мода.

Отмечено, что указанные замечания носят рекомендательный характер, не меняют результаты и никак не влияют на высокую оценку диссертации в целом.

Диссертация А.А. Афанасьева на соискание ученой степени доктора физико-математических наук представляет собой законченное научное

исследование, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, которые можно квалифицировать как научное достижение. В диссертации получен целый ряд новых результатов. Результаты интересны и представляются важными, в том числе и для приложений, в первую очередь для проблем захоронения углекислого газа, процессов фильтрации в кимберлитовых трубках и процессов конвекции в геотермальных системах.

В отзыве официального оппонента делается заключение, что из диссертационной работы, автореферата и опубликованных научных работ А.А. Афанасьева (17 из них вышли в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ для публикации докторских диссертаций) следует, что диссертация «Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в широком диапазоне давлений и температур» соответствует требованиям ВАК России, предъявляем к докторским диссертациям, установленным в п. II Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Название работы соответствует проведенному исследованию. Публикации по теме работы содержат описание примененной методики исследования и отражают основные полученные результаты, а А.А. Афанасьев, безусловно заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности «01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы».

Выбор Губайдуллина А.А., Дмитриева Н.М. и Ильичева А.Т. в качестве официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются известными специалистами в России и за рубежом в области механики многофазных сред и теории фильтрации, и имеют ряд работ, близких к теме диссертации.

**В отзыве ведущей организации отмечено, что в диссертации Афанасьева А.А. развиты методы теоретического исследования и численного моделирования неизотермической многофазной фильтрации в условиях усложненных фазовых переходов и критических явлений. Актуальность данного направления исследований для проблем рационального**

недропользования не вызывает как с научной точки зрения – получение новых знаний о вкладе нелинейных эффектов в показатели многофазных многокомпонентных течений в пористой среде, так и в прикладном плане: при подземном хранении (и захоронении) газа, разработке углеводородных месторождений и эксплуатации геотермальных систем. В данных приложениях течение флюидов в геологических пластах сопровождается сложными процессами, связанными как с неоднородным распределением фильтрационно-емкостных свойств и нелинейным видом кривых относительной фазовой проницаемости, так и со сложной зависимостью теплофизических свойств пластового флюида от давления, температуры и компонентного состава.

Научная новизна диссертации обусловлена тем, что в ней рассмотрены новые методы математического моделирования и аналитического исследования неизотермических течений в проницаемых геологических пластах с учетом сложного термодинамического описания свойств насыщающих флюидов. Основное внимание в диссертации уделено фильтрации в широком диапазоне давлений и температур, содержащем линии критических термодинамических параметров и области значительного не только количественного, но и качественного изменения теплофизических параметров флюида. Разработаны новые подходы для описания и исследования подобных процессов с взаимосвязанными гидродинамическими и термодинамическими явлениями, в которых могут образовываться области с двухфазными равновесиями типа жидкость-пар или жидкость-жидкость, а также области с трехфазным состоянием, с равновесием жидкость-жидкость-пар. Показано, что образование подобных областей может существенно влиять на гидродинамику движения флюидов. Автор разработал не только эффективный метод моделирования данных процессов, но и применил его к широкому кругу задач фильтрации.

Отзыв ведущей организации содержит следующие замечания:

1. К сожалению в диссертации нет ссылки и обсуждения монографии «Розенберг М.Д., Кундин С.А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа. М., Недра, 1976. – 325 с», в

- которой изложены основы равновесной и неравновесной многофазной многокомпонентной фильтрации и приведен ряд интересных решений;
2. С точки зрения практической значимости работы вероятно интереснее была бы задача о нагнетании углекислого газа в нефтяной пласт с целью повышения нефтеотдачи. В данном случае при пластовых температурах также могут формироваться области трехфазных парожидкостных равновесий углеводородной смеси, содержащей значительную долю растворенного углекислого газа.

Отмечено, что данные замечания не снижают общий очень высокий уровень диссертации.

Диссертация Афанасьева А.А. представляет собой законченную актуальную достоверную и обоснованную научно-исследовательскую работу, с возможностью практического и потенциалом дальнейшего исследования. Работа выполнена на высоком научном уровне. Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, подробные расчеты. Написано квалифицированно и последовательно. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

В отзыве ведущей организации сделано заключение, что диссертационная работа Афанасьева Андрея Александровича «Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в широком диапазоне давлений и температур» соответствует всем критериям, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Афанасьева А.А. и отзыв на нее рассмотрены, а отзыв утвержден на расширенном семинаре лаборатории Математического моделирования процессов фильтрации, Подземной гидродинамики и Математического моделирования гидрогеологических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики и машиностроения Казанского научного центра Российской

академии наук под руководством чл.-корр. РАН Губайдуллина Д.А., протокол № 1 от 18.05.2016 г.

Выбор ведущей организации обусловлен тем, что сотрудники ФГБУН ИММ КазНЦ РАН являются признанными специалистами в области подземной гидромеханики и теории многофазной многокомпонентной фильтрации и имеют широко известные достижения в областях науки, смежных с тематикой диссертации, и способны объективно оценить научную и практическую ценность диссертационного исследования.

**Получен положительный отзыв на автореферат без замечаний от Ермолаева Александра Иосифовича**, доктора технических наук, профессора, зав. кафедрой разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений ФГБОУ ВО РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

В отзыве отмечено, что актуальность диссертационной работы не вызывает сомнения, как с научной точки зрения (получение новых знаний о вкладе нелинейных эффектов в показатели многофазных фильтрационных течений), так и в прикладном плане (в проблемах разработки месторождений углеводородов, получения геотермальной энергии и подземного захоронения углекислого газа в водонасыщенных пластах). Работа отличается новизной результатов. Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием современной теории фильтрации многофазных сред и теории сильных разрывов, а также получением результатов, согласующихся в частных случаях с результатами других исследователей. Надежность проведенных расчетов подтверждается хорошим совпадением результатов расчетов тестов Общества инженеров-нефтяников с данными, опубликованными в литературе. Практическая значимость работы несомненно связана с разработанным комплексом программ.

Работа прошла хорошую апробацию. Автореферат и публикации полностью отражают основное содержание диссертации. Личный вклад автора подтверждается публикациями, большинство из которых опубликованы соискателем степени без соавторов.

В заключении отзыва проф. Ермолаева А.И. отмечено, что диссертационная работа «Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в широком диапазоне давлений и температур» является законченным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Афанасьев Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

**Получен положительный отзыв на автореферат без замечаний от доктора физ.-мат. наук, проф. Нагнибеды Екатерины Алексеевны и доктора физ.-мат. наук, проф. Матвеева Сергея Константиновича, профессоров кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета.**

В отзыве отмечено, что в автореферате убедительно обоснована актуальность рассматриваемой проблемы и необходимость учета сложных гидродинамических и термодинамических процессов при моделировании фильтрации. Указаны особенности технологических и природных явлений, для описания которых необходимы развиваемые в диссертации методы.

На основании автореферата можно заключить, что диссертация А.А. Афанасьева представляет собой фундаментальный научный труд, имеющий важное теоретическое и прикладное значение, диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

**Получена положительная рецензия проф. Майкла Кюна, главы Секции 3.4 – «Моделирование пластовых систем», директора Департамента 3 – «Геохимия» Немецкого научно-исследовательского центра по наукам о Земле (GFZ, Германия) на работу Афанасьева А.А., связанную с разработкой комплекса программ MUFITS. В рецензии отмечено, что разработанный Афанасьевым А.А. комплекс программ MUFITS способствовал развитию научных исследований, проводимых в Немецком научно-исследовательском**

центре по наукам о Земле. К настоящему моменту времени данный комплекс программ стал неотъемлемой частью программного обеспечения, используемого в Научном центре, так как он представляет хорошую эффективную альтернативу существующим научно-исследовательским и коммерческим комплексам программ, используемым при моделировании пластовых систем и в гидрогеологии.

Основные результаты диссертации опубликованы в 27 работах в научных журналах и электронных изданиях, из которых 17 – статьи, опубликованные в журналах, которые входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК. Всего соискатель имеет 77 опубликованных работ по теме диссертации. Основные работы по теме диссертации:

1. Афанасьев А.А. О постановке задач неизотермической фильтрации воды и пара в высокопроницаемом пласте // *Изв. РАН. МЖГ. 2010. №2. С. 73–84.*
2. Афанасьев А.А. Математическая модель неизотермической многофазной фильтрации бинарной смеси // *Изв. РАН. МЖГ. 2011. №1. С. 104–115.*
3. Афанасьев А.А. О течениях бинарных смесей в пористых средах при высоких давлениях и температурах // *ДАН. 2011. №4. С. 477–479.*
4. Афанасьев А.А. Об одном представлении уравнений многокомпонентной многофазной фильтрации // *Прикладная математика и механика. 2012. Т. 76. Вып. 2. С. 265–274.*
5. Афанасьев А.А. Моделирование свойств бинарной смеси углекислый газ-вода при до- и закритических условиях // *Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50(3). С. 363–370.*
6. Afanasyev A.A. Multiphase compositional modelling of CO<sub>2</sub> injection under subcritical conditions: The impact of dissolution and phase transitions between liquid and gaseous CO<sub>2</sub> on reservoir temperature // *Int. J. Greenhouse Gas Control 2013. V. 19. P. 731–742.*
7. Afanasyev A.A. Application of the reservoir simulator MUFITS for 3D modeling of CO<sub>2</sub> storage in geological formations // *Energy Procedia 2013. V. 40. P. 365-374.*

8. Афанасьев А.А., Мельник О.Э. О математическом моделировании многофазной фильтрации при околокритических условиях // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер.1, Математика. Механика*. 2013. Т. 68. №3. С. 68–72.
9. Афанасьев А.А., Мельник О.Э. Критерий неотрицательного производства энтропии для разностных схем расчета фильтрации // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. №3. С. 328–335.
10. Афанасьев А.А., Мельник О.Э. О построении конечно-разностной схемы расчета фильтрации при околокритических термодинамических условиях // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. №2. С. 246–255.
11. Афанасьев А.А., Мельник О.Э., Цветкова Ю.Д. Моделирование фильтрации при подземном захоронении углекислого газа с применением высокопроизводительных вычислительных систем // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2013. Т. 6. №4. С. 420–429.
12. Афанасьев А.А. Исследование эволюционности разрывов при фильтрации бинарной смеси // *Изв. РАН. МЖГ*. 2014. №1. С. 90–102.
13. Afanasyev A., Melnik O., Poritt L., Schumacher J., Sparks S.J. Hydrothermal alteration of kimberlite by convective flows of external water // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2014. V. 168. P. 1038.
14. Afanasyev A.A. A method of multi-phase compositional modeling under sub- and supercritical thermodynamic conditions // *Proceedings of the 14th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Catania, Sicily, Italy, 8–11 September 2014. – 2014. 17 pp.* (Индексируется Scopus).
15. Afanasyev A.A. On the Riemann problem for supercritical CO<sub>2</sub> injection into an aquifer // *Int. J. Greenhouse Gas Contr.* 2015. V. 42. P. 629–643.
16. Afanasyev A., Costa A., Chiodini G. Investigation of hydrothermal activity at Campi Flegrei caldera using 3D numerical simulations: extension to high temperature processes // *J. Volcanology Geothermal Res.* 2015. V. 299. P. 68–77.
17. Afanasyev A.A. Hydrodynamic modelling of petroleum reservoirs using simulator MUFITS // *Energy Procedia*. 2015. V. 76. P. 427–435.
18. Afanasyev A., Belyaeva E. Linear stability analysis for hydrothermal alteration of kimberlitic rocks // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 205. P. 1874–1885.

19. Афанасьев А.А., Султанова Т.В. Исследование гидродинамической неустойчивости фронта вытеснения при закачке углекислого газа в водонасыщенный пласт // *Изв. РАН МЖГ*. 2016. №4. С.85–96.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на Генеральной ассамблее Европейского общества по наукам о Земле (Вена, Австрия, 2010–2013, 2015, 2016 гг), Общем собрании Американского геофизического общества (Сан-Франциско, США, 2010–2012 гг), международной конференции Geofluids (Париж, Франция, 2012 г); Конференции-конкурсе молодых ученых НИИ механики МГУ (Москва, 2010–2015 гг), Всероссийской конференции «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2014 г); международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 2010 г), школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2010, 2014 гг); Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2011, 2015 гг); конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентности» (Звенигород, 2010, 2016 гг); Научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение» (Москва, 2012, 2014 гг); VI Молодежной научно-практической конференции «Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений» (Москва, 2014 г); V Международной молодежной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (Москва, 2013 г).

Постановки задач и полученные результаты обсуждались и получили одобрение на Семинаре по механике сплошных сред под руководством акад. РАН А.Г. Куликовского, проф. В.П. Карликова и член-корр. РАН О.Э. Мельника (Москва, МГУ, 2010, 2012, 2014, 2016 гг); Научно-исследовательском семинаре по газовой и волновой динамике под руководством акад. РАН Р.И. Нигматулина и проф. Н.Н. Смирнова (Москва, МГУ, 2016 г), Теле-семинаре по аэромеханике. ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбПУ – НИИ механики МГУ (2015 г); Секции «Математическое

моделирование и информатика» Ученого совета ООО Газпром ВНИИГАЗ (2014 г); Семинаре «Задачи управления: теория и приложения» под руководством проф. А.В. Фурсикова, проф. В.М. Тихомирова, проф. М.И. Зеликина и проф. В.П. Протасова (Москва, МГУ, 2012 г).

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **установлено**, что закон сохранения энергии в корректной постановке задач неизотермической фильтрации должен учитывать работу силы тяжести;
- **построена** новая конечно-разностная схема расчета неизотермической фильтрации, удовлетворяющая условию неотрицательного производства энтропии;
- **разработан** новый метод ускоренного расчета теплофизических свойств бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав при до- и сверхкритических термодинамических условиях;
- **определены** последовательности сильных разрывов и волн Римана, распространяющихся от скважины в водонасыщенный пласт при нагнетании сверхкритического углекислого газа в зависимости от термобарических условий в пласте и параметров газа;
- **установлено**, что фазовые переходы между жидким и газообразным углекислым газом при его утечке из пласта могут приводить к немонотонному распределению температуры в направлении течения;
- для реальных геологических систем **даны оценки** для вклада различных физических механизмов в удержание углекислого газа в водонасыщенном пласте при различных положениях нагнетательной скважины;
- **определены** параметры, наиболее сильно влияющие на интенсивность конвекции в геотермальных системах с учетом глубоководных областей, где температура выше критической температуры воды;
- **даны оценки** для параметров смеси, которой геотермальная система Campi Flegrei питается из магматического очага;
- **создана** модель неизотермической фильтрации в кимберлитовых трубках с учетом экзотермической минеральной реакции в системе флюид-порода и сопутствующих изменений проницаемости и пористости;

- впервые **обнаружен и исследован** физический механизм развития пространственной неустойчивости протекания минеральных реакций в кимберлитовых трубках. Характерный масштаб образующегося неоднородного распределения определяется балансом между дестабилизирующим эффектом от выделения тепла при реакции и стабилизирующим действием теплопроводности;
- **разработан** комплекс программ для численного моделирования многофазной фильтрации на суперкомпьютерных системах с учетом инженерных данных о строении геологических пластов и теплофизических свойствах флюидов.

**Совокупность данных теоретических положений, разработанных соискателем степени на основании выполненных в диссертации исследований, квалифицируется диссертационным советом как крупное научное достижение.**

**Теоретическая значимость исследования обусловлена**

- **обобщением** известного представления Годунова для гиперболических систем на случай смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию;
- **определением** требований к корректным постановкам задач неизотермической фильтрации;
- **развитием** асимптотических методов исследования нелинейных волн для уравнений смешанного типа, описывающих фильтрацию;
- **усовершенствованием** методов моделирования фильтрации с учетом усложненных термодинамических эффектов в условиях значительного изменения давления и температуры.

**Значение полученных соискателем результатов для практики** подтверждается тем, что разработанный соискателем комплекс программ, содержащий программную реализацию созданных методов моделирования, применяется в российских и зарубежных научно-исследовательских институтах при расчете подземного захоронения углекислого газа и

фильтрации в геотермальных системах. Комплекс будет полезен в проектных организациях нефтегазовой отрасли и других научно исследовательских институтах для расчета фильтрации в задачах рационального недропользования.

**Достоверность полученных результатов обусловлена**

- **использованием** классических уравнений механики сплошной среды; корректной, опирающейся на современные представления о нелинейных волнах и сильных разрывах, постановкой задач; аналитическим решением ряда задач;
- **получением** результатов, согласующихся в частных случаях с результатами других исследователей;
- **совпадением** результатов расчетов и аналитических решений (или численных решений, полученных другими авторами) для модельных задач;
- **совпадением** результатов расчета теплофизических свойств с данными лабораторных исследований, доступных из научной литературы;
- **совпадением** результатов расчетов фильтрации с наблюдениями за геофизическими системами.

**Все основные результаты, представленные в работе, получены лично автором** или при непосредственном участии автора. К ним относятся формулировка общего представления уравнений многокомпонентной фильтрации, требования к корректным постановкам задач неизотермической фильтрации, метод расчета теплофизических параметров бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав, результаты дисперсионного анализа уравнений фильтрации, исследования в области подземного захоронения углекислого газа, результаты исследования природных процессов, комплекс программ для численного моделирования многофазной фильтрации. Результаты других авторов, использованные в диссертации, во всех случаях содержат ссылки на источники. Диссертация охватывает широкий круг проблем многофазной фильтрации, изложенных в семи главах. Она соответствует критериям внутреннего единства, что подтверждается

наличием последовательного плана исследований, общего обоснованного подхода к решению рассматриваемых задач и взаимосвязи полученных выводов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, и принято решение присудить Афанасьеву Андрею Александровичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационного совета в количестве 20 человек, из них 13 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и 7 докторов наук по специальности 01.02.08 – Биомеханика, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета: за 18, против 1, недействительных бюллетеней 1.

Заместитель председателя  
диссертационного совета Д 501.001.89,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

А.Н.Осипцов

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.89,  
доктор физико-математических наук

В.В. Измоденов

Подписи удостоверяю:

И.о. декана механико-математического  
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



В.Н. Чубариков